

0716677-1

На правах рукописи

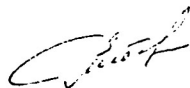
Рябов Игорь Владимирович

УДК 621.373, 621.396

**Быстросперестраиваемые цифровые
синтезаторы частотно-модулированных
радиосигналов для станций наклонного
зондирования ионосферы**

05.12.01 Теоретические основы радиотехники

АВТОРЕФЕРАТ



**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

КАЗАНЬ - 2000

Работа выполнена в Нижегородском научно-исследовательском
радиофизическом институте
(НИРФИ)

Научный руководитель: доктор физико-математических
наук, в.н.с. Урядов В.П.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических
наук, профессор Минуллин Р.Г.

кандидат технических наук,
доцент Болознев В.В.

Ведущая организация: Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн Российской
Академии наук
(ИЗМИР РАН)

Защита диссертации состоится "5" июля 2000 г.
в 14 час. в ауд. 210 физического факультета на заседании
диссертационного совета Д053.29.05 по специальности 05.12.01 -
теоретические основы радиотехники в Казанском Государственном
Университете.

Отзывы направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке имени
Н.И.Лобачевского Казанского Государственного Университета.

Автореферат разослан "29" мая 2000 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947798

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат технических наук

В.С. Бухмин

Постановка и актуальность задачи.

Современные требования к уровню исследований, выдвигаемые фундаментальной наукой и практикой, делают актуальной задачу разработки и внедрения новой диагностической техники для проведения радиофизических, геофизических, навигационных исследований на более высоком техническом уровне.

Развитие микропроцессорной техники позволяет в настоящее время создавать диагностическую аппаратуру, обладающую высокой разрешающей способностью, помехозащищенностью, хорошей электромагнитной совместимостью, небольшими габаритными размерами, массой и энергопотреблением в сравнении с традиционными методами исследований, основанных на использовании простых импульсных сигналов.

Сложные сигналы широко применяются во многих областях техники: радиолокации, навигации и связи и т.д. Использование сложных сигналов в радиолокации обеспечивает высокую разрешающую способность по дальности и по скорости, что позволяет существенно повысить технико-экономические показатели многих радиотехнических систем.

Авторитетные научные эксперты Министерств Обороны России и США считают, что быстродействующие интегральные ЦВС с выходной частотой до 500 МГц, малым шагом по частоте (доли Гц) и малым временем переключения (доли микросекунд) на 85% удовлетворяют потребности перспективных радиотехнических систем различного назначения.

Исторически первыми стали применяться радиосигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), которые имеют определенные преимущества перед другими сложными сигналами: возможность достижения большой девиации частоты и значительной скорости перестройки; сравнительная простота изменения формы огибающей ЧМ сигнала и скорости частотной модуляции для улучшения параметров сжатого сигнала; простота оценки, измерения и коррекции искажений. Они используются в качестве базовых при формировании непрерывных ЧМ сигналов треугольной, пилообразной или зигзагообразной формы, либо сигналов с V-, M-образной ЧМ. Эти сигналы при надлежащем выборе их параметров обеспечивают высокую раз-

решающую способность по дальности и скорости, сохраняя при этом все достоинства ЛЧМ сигналов.

Вопросам формирования и исследования ЛЧМ сигналов посвящены работы Кука, Бернфельда, Кэпьюти, Кибблера, а также Л.Т.Варакина, Д.Е.Вакмана, И.С.Гоноровского, М.Е.Лейбмана, Я.Д.Ширмана, М.И.Жодзишского, В.Н.Кочемасова, диссертационные работы А.Н.Фадеева, А.Н.Жарова и др.

В настоящее время разработаны основные принципы построения цифровых синтезаторов частот (ЦСЧ) и цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС), в значительной степени изучены их особенности и характеристики формируемых сигналов.

Однако, на сегодняшний день отсутствует строгая классификация ЦСЧ, недостаточно исследованы предельные возможности ЦСЧ по быстродействию (диапазону синтезируемых частот) и чистоте спектра формируемых сигналов.

Развитие ЦСЧ в настоящее время идет в основном в рамках известных структурных схем по пути их интегральной реализации, технологического повышения быстродействия, снижения энергопотребления и стоимости.

Наряду с этим, большое значение имеет поиск новых способов повышения качественных показателей ЦСЧ. В первую очередь это относится к быстродействию и чистоте спектра формируемых ЛЧМ колебаний, так как именно эти параметры остаются неудовлетворительными для ряда практических применений.

В начале 1985 г. в Марийском политехническом институте совместно с НИРФИ была создана экспериментальная ЛЧМ аппаратура для зондирования ионосферы непрерывными сигналами, которая прошла успешные испытания в режиме ВЗ и НЗ (в феврале 1986 г.) на трассе, протяженностью 220 км.

ЛЧМ радиокомплекс позволяет решать следующие радиофизические задачи:

1. Дальняя КВ локация ионосферных неоднородностей с высоким разрешением по времени группового запаздывания.
2. Диагностика ионосферы, возмущенной мощным КВ излучением, в широком диапазоне частот.
3. Краткосрочное прогнозирование ионосферного канала связи для повышения надежности систем КВ связи.

Долгосрочные и краткосрочные прогнозы на основе данных ионосферной службы не обладают достаточной оперативностью и на-

дежностью. Кроме того, эти прогнозы не обеспечивают надежность работы быстродействующих систем КВ связи, так как не содержат данных о многолучевости, об аномальных модах распространения сигнала, связь на которых для решения ряда задач может оказаться наивыгоднейшей. Небольшая мощность излучения позволила решать задачи диагностики ионосферы при приемлемых масс-габаритных характеристиках аппаратуры, лучшей электромагнитной совместимости и меньшем энергопотреблении, чем у импульсных ионозондов.

Перед автором диссертационной работы В.П.Урядовым была поставлена задача создания мобильного ЛЧМ комплекса, на базе которого была проведена серия экспериментов по зондированию естественной и модифицированной ионосферы.

Цель работы заключается в совершенствовании технических возможностей ЛЧМ ионозонда для регистрации быстропротекающих динамических процессов в ионосфере, регистрации кругосветных сигналов, для детального исследования искусственных мелкомасштабных неоднородностей, тонких ионосферных эффектов при ВЧ нагреве ионосферы и при авроральном распространении радиоволн. Для этого в работе решались следующие **основные задачи**:

1. Проведение экспериментов по наклонному зондированию ионосферы, анализ данных с точки зрения реализации потенциальных возможностей ЛЧМ ионозонда для решения радиофизических задач.
2. Разработка методов формирования ЛЧМ сигналов и принципов работы цифровых синтезаторов частотно-модулированных сигналов.
3. Аппаратная реализация структурно-схемотехнических решений ЦСЧ путем совершенствования известных и создания новых структур.
4. Экспериментальная апробация и компьютерный анализ спектральных и шумовых характеристик сигналов, формируемых ЦСЧ.
5. Расширение функциональных возможностей и улучшение технических характеристик ЦСЧ путем:
 - повышения быстродействия синтезаторов;
 - снижения амплитудных и фазовых шумов ЦСЧ;
 - увеличения скорости перестройки частоты;
 - повышения линейности закона изменения частоты.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

1. В создании на базе ЛЧМ ионозонда нового диагностического инструмента с широкими возможностями путем модернизации его синтезаторов частот, позволяющего проводить исследования тонкой структуры среднеширотной и полярной ионосферы, ее динамики, особых видов распространения радиоволн (кругосветных сигналов, лучей Педерсена) и быстропротекающих процессов при ВЧ нагреве ионосферы.
2. При проведении исследований потенциальных возможностей ЛЧМ ионозонда впервые получены новые экспериментальные данные:
 - о механизме формирования поля кругосветных сигналов (КС); обнаружена граничная частота, вблизи которой происходит смена механизма формирования поля КС с волноводного (при $f < f_{гр}$) на скачково-рикошетирующий (при $f > f_{гр}$);
 - на ионограммах трассы Хабаровск - "СУРА" - Темрюк во время нагрева ионосферы мощным КВ излучением наблюдались дополнительные треки. Исследована динамика ракурсной моды с течением времени суток. Ракурсный сигнал начинал регистрироваться в узкой полосе частот $\Delta f = 1$ МГц на частотах ниже максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ), затем диапазон частот ракурсной моды расширялся до 3 МГц, и рассеянный сигнал наблюдался выше МНЧ прямого сигнала;
 - на трансполярной трассе Хабаровск-Мурманск ионограммы наблюдались в виде фрагментов и имели сложную модовую структуру, радиосигнал распространялся в основном верхним лучом (модой Педерсена).

На защиту выносятся :

1. Новые схемотехнические структуры быстроперестраиваемых цифровых синтезаторов частотно-модулированных радиосигналов, защищенные авторским свидетельством СССР и патентами Российской Федерации:
 - цифровые синтезаторы частот, построенные на основе умножителя кодов, а.с. СССР № 1774464 [9];
 - цифровые синтезаторы частот, построенные на основе цифровых накопителей фазы, патент РФ № 2058659 [10];
 - цифровой синтезатор частот с быстрой перестройкой рабочей частоты, патент РФ № 2143173 [11];

- рекурсивный цифровой синтезатор частот [12];
 - цифровой синтезатор с полиномиальным законом изменения частоты [8].
2. Результаты экспериментов по наклонному зондированию естественной и модифицированной ионосферы на трассах различной протяженности.
 3. Новый импульсный метод синхронизации аппаратуры наклонного ЛЧМ зондирования, позволяющий сократить время синхронизации аппаратуры НЗ ионосферы в сравнении с временным и частотным методами [6].

Практическая ценность работы:

1. Разработаны и опробованы цифровые синтезаторы частот для применения в ЛЧМ радиокомплексах с целью исследования тонких ионосферных эффектов и дальнего распространения радиоволн.
2. Разработанные новые цифровые синтезаторы частот могут использоваться для создания радиопередающих и радиоприемных устройств с более высокими функциональными возможностями и техническими характеристиками для повышения скрытности и надежности маломощных систем КВ и УКВ связи с программной перестройкой рабочей частоты.
3. Разработанные способы формирования ЧМ сигналов и новые структуры ЦСЧ могут применяться в системах дальней КВ локации для увеличения разрешающей способности по дальности.

Внедрение результатов работы.

Результаты работы использованы в научных отчетах НИРФИ по НИРТП "Стратег-Прогноз" и дипломном проектировании студентов радиотехнического факультета Марийского Государственного Технического Университета.

Достоверность результатов обеспечивается правильной и корректной постановкой экспериментов; высокой разрешающей способностью аппаратуры; хорошей повторяемостью параметров и технических характеристик цифровых синтезаторов частот при тиражировании.

Личный вклад автора выразился в следующем:

Автор принимал активное участие на всех этапах выполнения работы по НИР “Спринт” и ТП “Стратег-Прогноз”. Им разработаны: способы синтеза широкополосных ЧМ радиосигналов на базе метода прямого цифрового синтеза, функциональные и принципиальные схемы цифровых синтезаторов частотно-модулированных сигналов [8-13]; новые схемотехнические структуры ЦСЧ для станций наклонного зондирования ионосферы; предложил импульсный метод синхронизации аппаратуры и оценил его эффективность на трассах различной протяженности [6]; принимал участие в подготовке и проведении экспериментов; в обработке, анализе, обсуждении и интерпретации полученных результатов [1-6,14].

Апробация работы:

1. Второе Всесоюзное совещание “Математические модели ближнего космоса” (Москва, 1990 г.).
2. Семинар “Цифровой синтез непрерывных ЧМ-сигналов” (Н.Новгород, 1991 г.).
3. Совещание “Авроральное распространения КВ-радиосигналов на трассе Хабаровск-Мурманск” (Мурманск, 1991 г.).
4. Межведомственный семинар “Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ-диапазона” (Н.Новгород, 1991 г.).
5. III Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves (ISIM-3). Sept. 9-13, 1991.
6. Материалы X межведомственной научно-технической конференции “Проблемы радиосвязи” (Н.Новгород, 1999 г.).

Публикации: работы автора опубликованы в журналах “Геомagnetизм и аэрономия”, “Приборы и техника эксперимента” (в печати), бюллетенях открытий и изобретений (2 авторских свидетельства СССР и три патента РФ на изобретение), препринтах НИРФИ, тезисах докладов Всесоюзных, Российских, межведомственных семинаров и конференций.

Объем работы: Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованной литературы из 147 наименований. Основное содержание диссертационной работы изложено на 177 страницах машинописного текста, иллюстрировано 33 рисунками и включает 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, сформулирована цель работы и кратко изложено ее содержание.

Первая глава посвящена диагностике ионосферы линейно-частотно-модулированными (ЛЧМ) сигналами.

В первом разделе рассматривается состав, принцип работы и технические характеристики радиокомплекса с непрерывным ЛЧМ сигналом, методика построения амплитудно-частотных (АЧХ), дистанционно-частотных (ДЧХ) характеристик, проведено сравнение методов синхронизации аппаратуры при наклонном зондировании ионосферы на трассах различной протяженности.

Показаны преимущества синхронизации аппаратуры наклонного зондирования ионосферы при помощи ЛЧМ сигналов длительностью 1 с.

Во втором разделе приведены результаты исследований естественной и модифицированной ионосферы широкополосными ЛЧМ сигналами.

В подразделе п.1.2.1 представлены результаты исследований распространения кругосветных сигналов (КС), проводившихся ноябре-декабре 1990 г. на трассе Хабаровск - Н.Новгород, протяженностью $S_1=5.800$ км для прямого сигнала (ПС) и $S_2=45.800$ км - для КС.

Цель этих исследований состояла в изучении особенностей дальнего распространения КВ радиосигналов, механизма формирования поля КС. Излучение ЛЧМ сигналов из Хабаровска осуществлялось на ромбическую антенну РГ65/4-1 ($\lambda_0=19$ м), ориентированную на Нижний Новгород (азимут $A=315^\circ$). Мощность передатчика $P=200$ Вт, в диапазоне частот $\Delta f=6-28,4$ МГц, скорость изменения частоты $f'=372$ кГц/с. Прием ЛЧМ-сигналов осуществлялся на антенну РГ65/4-1 ($\lambda_0=16$ м), ориентированную на Хабаровск (азимут $A=58^\circ$). В приемном пункте проводилась регистрация как прямых (ПС), так и прямых кругосветных сигналов (ПКС), задержанных относительно ПС на 138-139,5 мс. Приведены примеры ионограмм ПС и ПКС. Ионограммы ПКС имеют диффузный характер, общая ширина следа ПКС уменьшается с ростом частоты и приближением к МНЧ. Средний уровень ПС составляет ~ минус 85-90 дБ, а ПКС ~ минус 123-126 дБ относительно 1 В.

Анализ экспериментальных данных в сочетании с моделированием распространения КС на ЭВМ показал, что существует гранич-

ная частота $f_{гр} = 16-17$ МГц, вблизи которой происходит смена механизма формирования поля КС с волноводного - при $f < f_{гр}$ на скачкообразно-рикошетирующий - при $f > f_{гр}$.

Результаты моделирования дисперсионных характеристик КС, выполненных В.П.Урядовым подтвердили волноводную природу низкочастотной ветви КС. Вместе с тем, как показали эксперименты, для более полного изучения особенностей КС, в частности, его дисперсионных характеристик, выделение различных мод КС, более точного определения граничной частоты, сопоставление характеристик КС в спокойных и магнитовозмущенных условиях требуются более высокие метрологические характеристики ЛЧМ-ионозонда, которые в значительной степени определяются параметрами цифровых синтезаторов частот (ЦСЧ), формирующими ЛЧМ сигнал.

Подраздел 1.2.2 посвящен исследованию дальнего распространения КВ в условиях модификации ионосферы мощным КВ излучением. Компания была проведена на радиолинии Хабаровск - "СУРА"- Темрюк. Эта задача была поставлена В.П.Урядовым, в проведении измерений, обработке и анализе результатов участвовали Н.В.Рябова и автор диссертации.

Цель данных исследований состояла в изучении возможности управления дальним распространением КВ за счет вывода радиоволн посредством ракурсного рассеяния РРВ на мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностях. Зондирование ионосферы осуществлялось из Хабаровска в диапазоне частот 6 - 28 МГц. Прием ЛЧМ сигналов осуществлялся в Темрюке, расположенном к югу от трассы Хабаровск-Васильсурск на расстоянии ~ 1300 км от нагревного стенда (угол рассеяния 30°). Прием осуществлялся на горизонтальную ромбическую антенну, ориентированную на область возмущения.

Нагревный стенд "Сура" расположен в г.Васильсурске Нижегородской области. Его передатчик работал с эффективной мощностью $P_G = 100$ МВт и излучал вертикально вверх волны обыкновенной поляризации на частоте волны накачки (f_n), которая выбиралась вблизи критической частоты слоя F_2 ($f_n < f_{oF2}$). Воздействие на ионосферу осуществлялось циклами по 10 минут: 5 мин. - нагрев, 5 мин. - пауза. Наблюдения осуществлялись с 22.00 до 06.00 мск, когда на трассе для данного сезона (весеннее равноденствие) существовал максимальный отрицательный градиент электронной концентрации, обеспечивающий захват радиоволн в приподнятый ионосферной волно-

вой канал. В Темрюке на ионограммах НЗ во время "нагрева" ионосферы наблюдались дополнительные треки. Полученные данные позволили исследовать динамику ракурсной моды с течением времени суток. Ракурсные моды начинали регистрироваться в 22.40 мск в узкой полосе частот $\Delta f \sim 1$ МГц на частотах ниже МНЧ прямого сигнала.

С течением времени расширялся диапазон частот ракурсной моды с $\Delta f \sim 1,8$ МГц в 23.33 мск до $\Delta f \sim 3,1$ МГц в 00.30 мск, а сам рассеянный сигнал наблюдался выше МНЧ прямого сигнала.

Примерно до 02.00 мск диапазон частот ракурсного сигнала и его положение на ионограмме НЗ относительно прямого сигнала остаются неизменными (падает лишь интенсивность сигнала и растет его диффузность). В период времени с 02.00 до 03.00 мск диапазон частот ракурсной моды сужается до $\Delta f \sim 1$ МГц, растет диффузность и он регистрируется на частотах f больше МНЧ прямого сигнала. После 03.00 мск рассеянный сигнал практически не наблюдался, что, вероятно, связано с низкой эффективностью нагрева (критическая частота f_{oF2} становится меньше частоты волны накачки $f_{н, \min} = 4,8$ МГц).

Математическое моделирование показало, что в период наблюдения на частотах выше МНЧ прямого сигнала радиоволны на трассе Хабаровск - Васильсурск распространяются в приподнятом ионосферном EF- волноводе. Нагрев ионосферы стендом "Сура" приводит к образованию неоднородностей и выводом их энергии на поверхность Земли за счет ракурсного рассеяния. Интервал появления ракурсной моды определялся несколькими факторами: механизмом запитки (возбуждения канала) и выводом радиоволн из канала на искусственных ионосферных неоднородностях и для более четкого определения характеристик ракурсной моды необходимо повышать чувствительность и разрешающую способность аппаратуры.

Необходимость такой модернизации ЛЧМ ионозонда подтвердили также результаты диагностики модифицированной ионосферы в экспериментах "на просвет" на односкачковой трассе, которые проводились в октябре-ноябре 1990 и в октябре 1997 г. на радиолинии Йошкар-Ола - Нижний Новгород протяженностью 220 км, а результаты исследований приведены в п.1.2.3. Нагревный стенд "Сура" располагался примерно в 25 км к югу от центра трассы и работал циклами (15 мин. - нагрев, 15 мин. - пауза). Излучение осуществлялось вертикально вверх волной обыкновенной поляризации: два передатчика работали синфазно на частоте 6,2 МГц, третий - на частоте

5,8 МГц. ЛЧМ зондирование проводилось в диапазоне частот от 3 до 10 МГц. Анализ частотной зависимости амплитуд, нормированных на максимальное значение для 14-15 минуты паузы показал, что в первые 2-3 минуты нагрева наблюдается ослабление зондирующего сигнала во всей полосе частот на величину $\sim 2-6$ дБ. После выключения нагревного стенда амплитуда сигнала восстанавливается за время $\sim 3-4$ минуты.

Общий эффект ослабления диагностического сигнала связан с рассеянием радиоволн на среднемасштабных неоднородностях с размерами 300-1000 м.

Третья серия экспериментов была проведена на трансполярной трассе Хабаровск-Мурманск, цель которых состояла в изучении особенностей распространения КВ в условиях развитой неоднородной структуры высокоширотной ионосферы. Результаты исследований приведены в п.1.2.4. Отмечена сложная модовая структура сигнала. Ионограммы наблюдались в виде фрагментов. Распространение ЛЧМ сигналов осуществляется в основном модой Педерсена (верхним лучом). И это согласуется с теоретическими расчетами Л.М.Ерухимова, В.П.Урядова и Ю.Н.Черкашина, где показано, что в условиях развитой неоднородной структуры ионосферы происходит стабилизация Педерсеновской моды.

Изучение этого эффекта стабилизации представляет собой несомненный научный интерес как с точки зрения изучения механизма распространения Педерсеновской моды, так и решения обратной задачи - определения параметров неоднородной структуры ионосферы, каналлирующей квазикритические лучи.

Для изучения физической природы образования флуктуационного волновода необходимо улучшать технические параметры диагностической аппаратуры наклонного ЧМ зондирования ионосферы. Результаты этих экспериментов показали широкие возможности ЛЧМ ионозонда для решения фундаментальных и прикладных исследований распространения радиоволн и вместе с тем стимулировали разработку нового метода формирования ЧМ радиосигналов для улучшения метрологических характеристик ЛЧМ радиокомплекса.

В п.1.2.5 приведены результаты возвратно-наклонного зондирования ионосферы на трассе Йошкар-Ола - Уральские горы - Н.Новгород.

На ионограмме ВНЗ присутствуют треки прямого сигнала: мода 1F2 и мода 2F2. Сигнал ВНЗ продолжает моду 2F2 и простирается до

$f = 23$ МГц. Для принятого сигнала характерны резкий передний и размытый задний фронты сигнала, что согласуется с результатами исследований Ю.А.Чернова. Проведен расчет и построен график зависимости группового пути от частоты зондирующего ЛЧМ сигнала.

В выводах по первой главе отмечено, что необходимо расширить частотный и динамический диапазон аппаратуры, повысить ее чувствительность. Для этого **нужно повысить быстродействие, снизить уровень амплитудных и фазовых шумов ЦСЧ** для решения последующих задач КВ радиолокации и радиофизических исследований ионосферы на более высоком техническом уровне.

Во второй главе рассмотрены вопросы построения систем синтеза частот прямого и косвенного синтеза, приведен обзор литературы, посвященный методам синтеза высококачественных ЧМ сигналов, используемых в аппаратуре НЗ ионосферы.

В первом разделе проведена классификация методов синтеза частот, отмечены их достоинства и недостатки; сформулированы требования к основным параметрам систем синтеза частот.

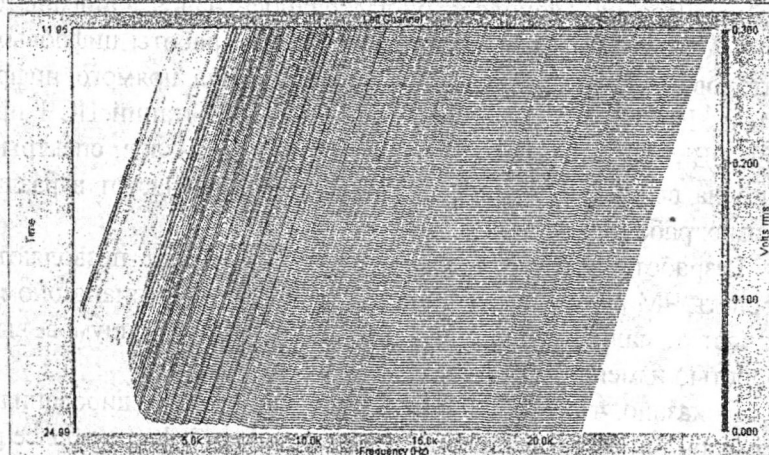
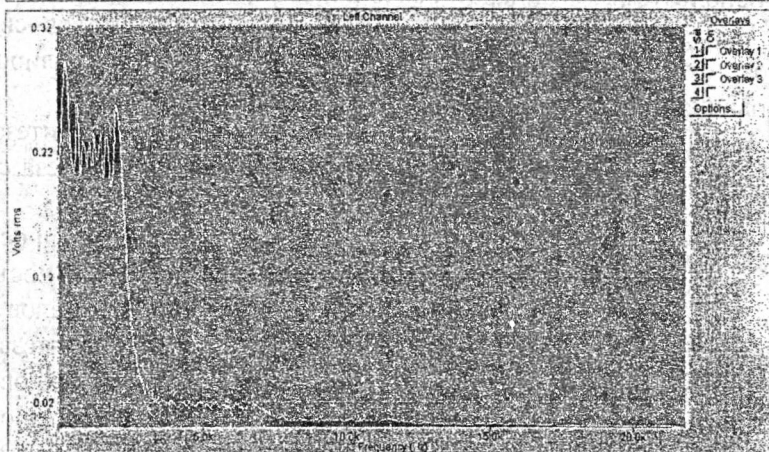
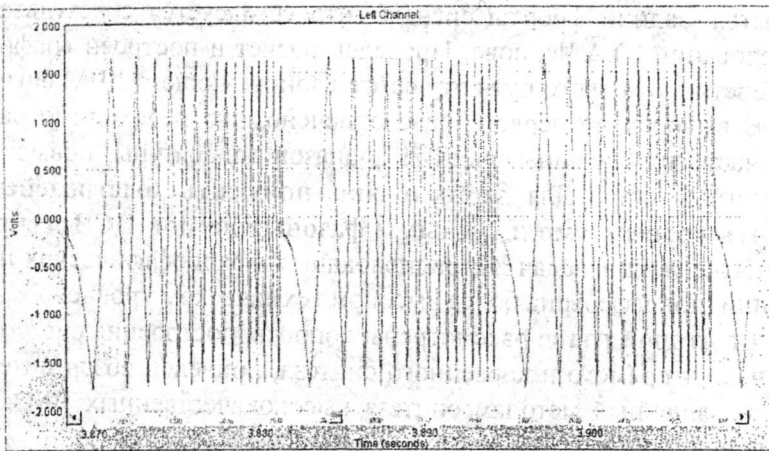
Во втором разделе описываются цифровые методы синтеза частот, принципы работы устройств прямого цифрового синтеза сигналов, отмечены преимущества этого метода синтеза.

В третьем разделе рассматриваются теоретические вопросы построения синтезаторов многоуровневых колебаний, особенности построения структурных схем, вопросы формирования сигналов с линейной частотной модуляцией, фазовые отклонения в синтезаторах частот, а также цифровые методы формирования ЛЧМ сигналов.

Третья глава посвящена разработке методов формирования непрерывных широкополосных ЧМ радиосигналов. Описаны структурно-схемотехнические решения и принцип работы цифровых синтезаторов частот, построенных на базе метода прямого цифрового синтеза. Приведены результаты натурных испытаний ЦСЧ при помощи ЭВМ. На рисунке приведены формы сигналов, спектры колебаний на выходе ЦАП цифровых синтезаторов частот в различных режимах работы.

Разработанные цифровые синтезаторы частот позволяют формировать ЧМ радиосигналы с большим частотным диапазоном рабочих частот, малым уровнем амплитудных и фазовых шумов, высокой скоростью изменения частоты.

Показано, что для аппаратуры наклонного зондирования ионосферы зондирующий радиосигнал "треугольной" формы более пред-



почтителен по сравнению с "пилообразным", т. к. уровень гармоник высших порядков у "треугольного" сигнала убывает значительно быстрее.

Для формирования сигнала "треугольной" формы отпадает необходимость в функциональном преобразователе "код-синус" или "код-косинус", который требуется при формировании синусоидального или косинусоидального сигналов. При этом достигается значительное повышение быстродействия ЦСЧ.

Исследования спектральных характеристик ЦСЧ показали, что нерекурсивные цифровые синтезаторы частот обладают более высокой спектральной чистотой колебаний по сравнению с рекурсивным.

В то же время рекурсивный цифровой синтезатор частот обладает самым высоким быстродействием за счет сокращения разрядности фазового вычислителя, при этом он имеет такую же высокую степень линейности изменения частоты, как и нерекурсивный удвоенной разрядности.

В п.3.7 рассмотрены перспективы применения цифровых синтезаторов в адаптивной системе связи, диагностической аппаратуре, в измерительной и телевизионной технике.

Теоретически показано и экспериментально установлено, что предложенные структуры ЦСЧ обладают более высоким быстродействием и более широкими функциональными возможностями по сравнению с существующими.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны и изготовлены действующие образцы цифровых синтезаторов частот, позволяющие улучшить метрологические характеристики ЛЧМ ионозонда.

Цифровой синтезатор частот на основе цифровых накопителей кодов, обладающий расширенным диапазоном частот ЛЧМ сигнала, дает возможность решать задачи по исследованию характеристик кругосветных сигналов и дальней КВ локации ионосферных неоднородностей.

Цифровой синтезатор частот на основе умножителя кодов дает возможность повысить разрешающую способность ЛЧМ зонда до 5 мкс и решать задачи по исследованию тонких ионосферных эффектов при модификации ионосферы мощным КВ излучением.

Цифровой синтезатор частот с быстрой перестройкой рабочей частоты (с максимальной скоростью перестройки 20-50 МГц/с) предназначен для проведения регистрации быстропотекающих динамических процессов в ионосфере. для повышения надежности, помехозащищенности и скрытности сигналов в перспективных системах КВ и УКВ связи с программной перестройкой рабочей частоты.

Рекурсивный цифровой синтезатор частот, обладающий более высоким быстродействием и малым шагом по частоте, предназначен для решения задач дальней КВ локации.

Цифровой синтезатор с полиномиальным законом изменения частоты, позволяющий увеличить разрешающую способность КВ ЧМ зондов за счет расширения базы зондирующего сигнала, предназначен для исследования тонкой структуры ионосферы в режиме ВНЗ.

Все перечисленные новые схемотехнические структуры цифровых синтезаторов частот защищены патентами Российской Федерации и авторским свидетельством СССР на изобретение.

Кроме того, предложен новый импульсный метод синхронизации приемной и передающей частей аппаратуры, который позволит сократить время синхронизации в 5-6 раз по сравнению с известными временным и частотным методами.

2. При проведении исследований потенциальных возможностей ЛЧМ ионозонда, в состав которого входят цифровые синтезаторы частот, впервые были получены новые радиофизические результаты.

Установлены оптимальные условия для распространения кругосветных сигналов, которые зависят от угла α между направлением трассы и линией терминатора. Диапазон частот кругосветного сигнала тем шире, чем меньше угол α . Установлено, что прием КС прекращается при $\alpha > 25^{\circ} - 30^{\circ}$, а также в условиях сильных ионосферных и магнитосферных возмущений. Обнаружена граничная частота, вблизи которой происходит смена механизма формирования поля КС с волноводного - при $f < f_{гр}$ на скачко-рикошетирующий - при $f > f_{гр}$.

Показана возможность управления дальним распространением КВ за счет вывода радиоволн посредством ракурсного рассеяния на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях. Исследована динамика ракурсной моды в течение суток. Обнаружено, что ракурсный

сигнал наблюдался на более высокой частоте, чем МНЧ прямого сигнала.

Экспериментально установлено, что в начальной стадии нагрева ионосферы (в первые 2-3 мин.) мощным КВ излучением происходит ослабление отраженного КВ сигнала и его восстановление после прекращения нагрева (через 3-4 мин.), что связано с рассеянием радиоволн на среднемасштабных неоднородностях.

Установлено, что на трансполярных трассах в условиях сильных ионосферных и магнитосферных возмущений распространение КВ сигналов осуществляется в основном модой Педерсена, что согласуется с теоретическими расчетами других авторов.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Иванов В.А., Рябов И.В., Урядов В.П. и др. Эффект солнечного затмения 22 июля 1990 на среднеширотных трассах протяженностью 4 Мм. // Геомагнетизм и аэрономия, 1992, № 1, с.164-166.
2. Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябов И.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. Автоматизированный ЛЧМ комплекс в сети станций наклонного зондирования естественной и модифицированной ионосферы. // Препринт № 323. Н.Новгород, НИРФИ, 1991. - 56 с.
3. Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябов И.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. Исследование влияния искусственного ВЧ нагрева на дальнейшее распространение КВ. // В сб.тр. 2-го Всесоюзного совещания: "Математические модели ближнего космоса". МГУ, М., 1990. с. 54-55.
4. Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябов И.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. Результаты использования ЛЧМ - ионозонда в адаптивной среднеширотной ДКМВ - радиолинии, протяженностью 3 Мм. // В сб.: "Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ диапазона". Н.Новгород. 1991. Тез. Докл. с.23.
5. Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябов И.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. Сверхдальнее ЛЧМ-зондирование как метод диагностики ионосферного канала связи. // В сб.: "Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ диапазона". Н.Новгород. 1991. Тез. Докл. с.24-25.

6. Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябов И.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. Сеть станций наклонного зондирования ионосферы. Сетевой ЛЧМ-ионозонд. // В сб.: "Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ диапазона". Н.Новгород. 1991. Тез. Докл. с.26-27.
7. Рябов И.В. Адаптивная система связи. // В сб.: "Проблемы радиосвязи". Н.Новгород, 1999. с.56-57.
8. Рябов И.В. Цифровой синтезатор частот. // В сб.: "Проблемы радиосвязи". Н.Новгород, 1999. с. 202-204.
9. № 1774464 СССР. МКИ H03B 19/00. Цифровой синтезатор частот / Рябов И.В., Рябова Н.В., Урядов В.П. - Заявл. 30.08.90, Оpubл. 07.11.1992. Бюл. № 41.
10. Патент № 2058659 Российской Федерации МКИ H03B 19/00. Цифровой синтезатор частот. / Рябов И.В., Фищенко П.А. - Заявл. 23.09.93, Оpubл. 20.04.1996. Бюл. № 11.
11. Патент № 2143173 Российской Федерации МКИ H03B 19/00. Цифровой синтезатор частот. / Рябов И.В., Рябов В.И. - Заявл. 04.02.99. Оpubл. 20.12.1999. Бюл. № 35.
12. Положительное решение ФИПС о выдаче патента на изобретение "Цифровой синтезатор частот"/ Рябов И.В., Рябов В.И., Голуб Д.В. по заявке № 99107900/09 (008116) от 13.04.1999.
13. Положительное решение ФИПС о выдаче патента на изобретение "Цифровой синтезатор частот"/ Рябов И.В., Рябов В.И. по заявке № 99108100/09 (008199) от 13.04.1999.
14. V.A.Ivanov, V.V.Shumaev, N.V.Ryabova, I.V.Ryabov, V.P.Uryadov, V.S.Maksimov, L.N.Rubtsov, A.V.Blohin, N.M.Boguta. Research of Ionosphere Artifical Effect on SW Propagation on Long Paths // PROCEEDINGS of the III Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves (ISIM-3). Moscow.1991. P.95-96.

Отпечатано в Центре оперативной полиграфии ООО "ДальгеоАВАН" с готового оригинал-макета
Лицензия: ЛР № 071550, лицензия ПЛД № 2030
Тираж: 80 экз. 112. Печать офсетная, формат А4
424000, РМЗ, г. Йошкар-Ола, б. Чуваша, 36

